

## 기체 CO<sub>2</sub>를 사용한 In-situ 탄산화 모르타르 성능평가

# The Performance Evaluation of In-situ Carbonation Mortar Using Gaseous CO<sub>2</sub>

박창건<sup>1</sup> · 류득현<sup>2</sup> · 최성우<sup>3</sup> · 위광우<sup>4</sup> · 임승민<sup>5\*</sup>

Changgun Park<sup>1</sup> · Deukhyun Ryu<sup>2</sup> · Seongwoo Choi<sup>3</sup> · Kwangwoo Wi<sup>4</sup> · Seungmin Lim<sup>5\*</sup>

(Received August 25, 2023 / Revised September 1, 2023 / Accepted September 2, 2023)

In this study, two phases were conducted to investigate the direct injection of gaseous CO<sub>2</sub> into cement mortar. The aim was to advance carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technology by harnessing industrial waste CO<sub>2</sub> from the domestic ready-mixed concrete industry. In the first phase, the factors influencing the physical properties of cement mortar when using gaseous CO<sub>2</sub> were identified. This included a review of materials to achieve physical properties comparable to a reference formulation. As a result of this phase, it was confirmed that traditional approaches, such as adjusting the water-to-cement ratio, had limitations in achieving the desired physical properties. Consequently, the second phase focused on the optimization of CO<sub>2</sub>-injected mortar. This involved studying the CO<sub>2</sub> application and mixing method for cement mortar. Changes in properties were observed when gaseous CO<sub>2</sub> was injected into the mortar. The optimal injection quantity and time to enhance the compressive strength of mortar were determined. As a result, this study indicated that an extra mixing time exceeding 120 seconds was necessary, compared to conventional mortar. The optimal CO<sub>2</sub> injection rate was identified as 0.1 to 0.2 % by weight of cement, taking both flowability and compressive strength performance into account. Increasing the CO<sub>2</sub> injection time did not further enhance strength. For this approach to be employed as a CCUS technology, additional studies are required, including a microstructural analysis evaluating the amount of immobilized CO<sub>2</sub>.

**키워드** : In-situ 탄산화, 탄소 활용, 탄소저장

**Keywords** : In-situ carbonation, Carbon utilization, Carbon storage

## 1. 서론

탄소중립 2050 목표 선언에 따라 CCUS(Carbon Capture, Utilization & Storage) 기술이 지속적으로 성장 중에 있으며 건설 산업에서도 CO<sub>2</sub> 포집 기술에서 저장·활용까지 CCUS 기술 전반에 관한 연구가 활발히 진행 중에 있다(Bertos et al. 2004; Wi et al. 2022). 건설산업에서 레미콘은 매년 약 13,000만m<sup>3</sup> 이상 대량 사용되는 건설재료임에도 불구하고 콘크리트 탄산화에 의한 철근부식 등의 부정적 인식으로 무근, 벽돌 등의 콘크리트 2차 제

품 양생 외 직접 주입에 의한 CO<sub>2</sub> 활용사례는 전무하다.

해외에서는 레미콘 제조공정에서 CO<sub>2</sub>를 콘크리트 믹서에 직접 주입하는 CO<sub>2</sub> 활용기술(이하, In-situ 탄산화 기술)이 실용화되어 운영되고 있으며(Jang et al. 2016; Olajire 2013), 해당 기술은 포집된 산업부산 CO<sub>2</sub>의 저장뿐만 아니라 콘크리트 성능증진으로 시멘트 사용량 저감에도 기여하여 약 15 CO<sub>2</sub> · kg/m<sup>3</sup> 수준의 CO<sub>2</sub> 감축효과가 있는 것으로 알려져 있다(CARBONCURE Company's Website 2023).

반면 국내에서는 콘크리트 원재료로써 CO<sub>2</sub>의 명확한 구분이

\* Corresponding author E-mail: smlim@kangwon.ac.kr

<sup>1</sup>유진기업(주) 기술연구소 과장 (Research & Development Center, Eugene Corporation, Ilsan, 10566, Korea)

<sup>2</sup>유진기업(주) 기술연구소 연구소장 (Research & Development Center, Eugene Corporation, Ilsan, 10566, Korea)

<sup>3</sup>유진기업(주) 기술연구소 부장 (Research & Development Center, Eugene Corporation, Ilsan, 10566, Korea)

<sup>4</sup>한양대학교 건설구조물 내구성 혁신 연구센터 박사후연구원 (DuraBi Research Center, Hanyang University, Ansan, 15588, Korea)

<sup>5</sup>강원대학교 건축학부 조교수 (Department of Architecture, Kangwon National University, Chuncheon, 24341, Korea)

Copyright © 2023 by Korean Recycled Construction Resources Institute

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

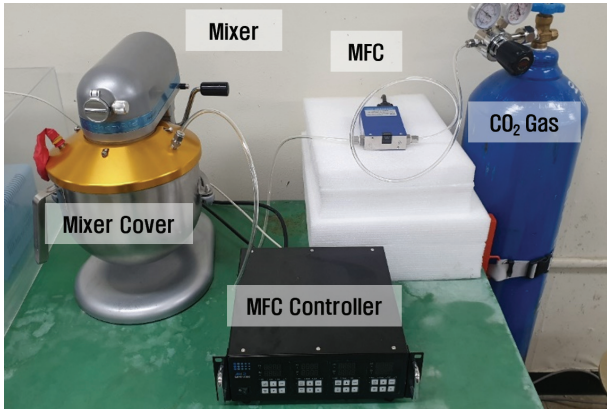
되어있지 않으며, CO<sub>2</sub> 직접 주입 모르타르 또는 콘크리트에 관한 연구도 이루어지지 않은 실정이다. 기존 시멘트계 재료에 CO<sub>2</sub>를 직접 주입하여 고정화하는 기술은 포집된 산업부산 CO<sub>2</sub>의 활용 기술 중 하나로 건설산업의 탄소중립 기여에 지대한 영향을 미칠 수 있다. 단, 새로운 영역에 해당되는 기술로 국가별 상이한 사용 재료, 환경, 제도 등을 고려하여 다양한 인자에 대한 평가와 검증이 요구된다.

이에 본 연구에서는 국내 레미콘 산업의 산업부산 CO<sub>2</sub> 활용 기술 확보를 통한 CCUS 기술의 부상을 목적으로 기체 CO<sub>2</sub>를 주입한 시멘트계 재료의 모르타르 비빔장비를 구축하고, 비빔방법 도출 및 모르타르 물성평가를 실시하고자 한다.

## 2. 실험계회

### 2.1 In-situ 탄산화 믹싱장치

기체 CO<sub>2</sub> 주입을 위한 믹싱장치는 믹서, 믹서커버, 질량유량제어기(Mass Flow Controller, MFC), 질량유량제어기 컨트롤러(MFC controller), 기체 CO<sub>2</sub>로 구성하였다(Fig. 1 and Fig. 2).



(a) Composition



(b) Mixer bowl drive and height adjustment

Fig. 1. In-situ carbonation mixing system

믹서커버는 기체 CO<sub>2</sub> 주입 후 외부 유출을 방지하기 위한 밀실화 장치로, 믹서와 믹서보울 사이를 잇는 형태로 이음부를 패킹하여 제작하였으며, 믹서보울 높이조절장치 설치로 믹서보울별 규격 오차로 인한 들뜸현상을 보완하였다.

식 (1)에 따라 산정된 20 °C, 1 atm 기준 기체 CO<sub>2</sub>의 밀도를 적용하여 MFC 설정 용량에 따른 초당 CO<sub>2</sub> 주입량(g)을 산정하였다. 사용 분체량 900 g 기준 CO<sub>2</sub> 주입율 0.5 B<sub>w</sub>%(4.5 g)를 15초 이내에 주입하기 위한 MFC의 소요용량은 10 L/min.이며, 이를 반영하여 기체 CO<sub>2</sub>의 정량 주입을 위한 장치로 10.4 L/min.용량의 MFC를 선정하였다. CO<sub>2</sub>의 정량은 목표 주입용량과 주입시간에 맞춰 MFC 용량을 설정하였다.

$$d = PM \cdot RT \quad (1)$$

여기서,  $d$ 는 기체의 밀도(g/L),  $P$ 는 압력(atm),  $M$ 은 몰 질량(g/mol),  $R$ 은 기체 상수(atm · L/mol · K),  $T$ 는 온도(K)를 나타낸다.

### 2.2 사용재료 및 배합

1종 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 화학적 물리적 특성은 Table 2와 같다. 골재의 경우 ISO 표준사를 사용하였으며, 표준사의 물리적 특성은 Table 3과 같다.

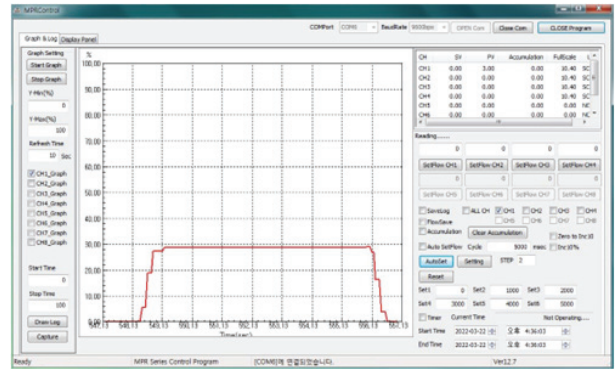


Fig. 2. MFC controller settings and running screen

Table 1. MFC capacity setting

Binder (g)	Gaseous CO <sub>2</sub>		MFC setting (L)	
	Usage (g)	Injection rate (B <sub>w</sub> %)	Injection time (sec.)	
900	0.9	0.1	5	15
	4.5	0.5	6	2
			-	10

Table 2. Chemical and physical properties of cement

	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	LOI
Cement	65.6	17.5	4.1	2.6	3.5	3.6	1.3

Note: Density and Blaine are 3.14 g/cm<sup>3</sup> and 3,712 cm<sup>2</sup>/g, respectively

Table 3. Physical properties of sand

	Density (g/cm <sup>3</sup> )	FM (%)	Water absorption ratio (%)
Sand	2.60	2.82	0.43

Table 4. Mixture proportions of mortar

Type	W/C	Water (g)	Cement (g)	Sand (g)
A	0.50	225.0	450	1,350
B	0.55	247.5	450	1,350

Table 4는 본 연구에서 사용한 모르타르 배합표를 나타낸다. 각 배합은 KS L ISO 679(시멘트의 강도 시험 방법)에 준하여 질량으로 시멘트 1, 골재 3의 비율로 고정하고, 물/시멘트 비는 2가지 타입(0.50, 0.55)으로 설정하였다.

Table 5. In-situ carbonation mixing conditions for 1<sup>st</sup> test

Specimen	Mortar type	CO <sub>2</sub> Injection	
		Quantity (B <sub>w</sub> %)	Time (sec.)
PA	A	-	-
CA		0.15	15
PB	B	-	-
CB		0.15	15

※ PA = Plain A type mortar, CA = CO<sub>2</sub> injection A type mortar

### 2.3 비빔조건 및 방법

비빔조건은 2 단계로 나누어 설정하였다. 1단계는 Fig. 3(a)와 같이 기존 KS L 5109(굳지 않은 수경성 시멘트 페이스트 및 모르타르의 기계적 혼합 방법)의 모르타르 혼합 절차에 따라 이에 적합한 혼합기를 사용하여 기계적으로 혼합하였다. 1단계는 CO<sub>2</sub> 주입에 따라 모르타르 물성에 미치는 영향인자를 파악하고, 배합수량 제어 등의 모르타르 배합을 조정하여 기존과 동일한 비빔조건에서 재료적 접근으로 기존 모르타르 대비 성능발현율의 평가를 목적으로 한다. 실험인자 및 수준은 Table 5와 같으며, CO<sub>2</sub> 주입량은

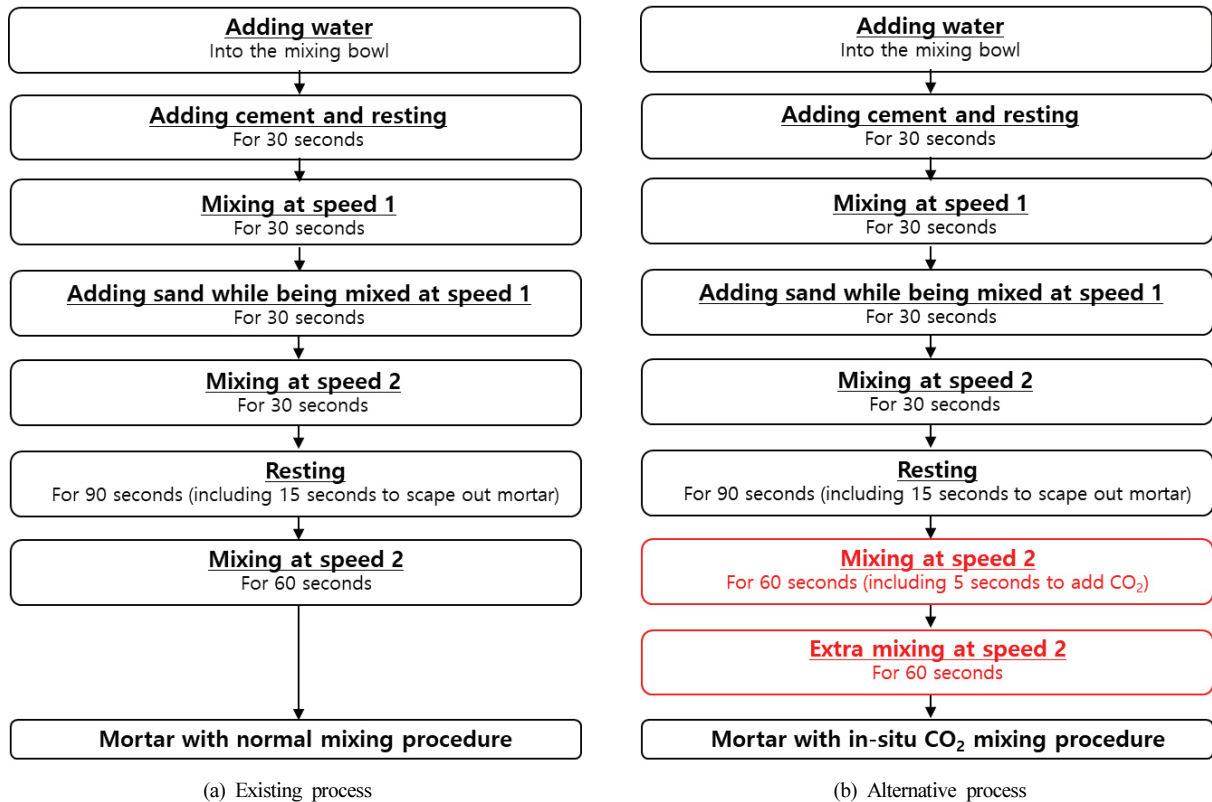


Fig. 3. In-situ carbonation mortar mixing process

고정인자로 설정하고, 모르타르 물/시멘트비 2종에 대한 CO<sub>2</sub> 주입 유/무를 실험인자로 설정하였다. CO<sub>2</sub>는 모르타르 정지 후 2차 비빔이 시작되는 시점에 믹서 가동과 동시에 15초간 주입되며 CO<sub>2</sub> 주입 과정에서 믹서는 정지하지 않는다.

2단계는 배합조정 외 비빔방법을 실험인자로 평가하는 단계로 KS L 5109에서 추가 믹싱시간을 고려하여 Fig. 3(b)에 따라 실시하였다. 실험인자 및 수준은 Table 6과 같으며 CO<sub>2</sub> 주입 후 추가비빔 시간, CO<sub>2</sub> 주입시간, CO<sub>2</sub> 주입량 총 3가지 실험인자에 대해 각각 4~6의 수준으로 구성하였다. 2단계는 각 실험인자의 특성에 따라 추가되는 믹싱시간의 차이로 총 비빔시간은 변동된다. CO<sub>2</sub> 주입시간, CO<sub>2</sub> 주입량 시험에서 추가비빔시간은 최적으로 도출된 120초가 적용되며 세부배합은 Table 7과 같다.

Table 6. Experimental factors and levels for 2<sup>nd</sup> test

Factors	Unit	Levels
CO <sub>2</sub> injection time	Seconds	5, 30, 60, 90, 120
CO <sub>2</sub> injection quantity	Binder weight %	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
Extra mixing	Seconds	0, 30, 60, 90, 120

Table 7. In-situ carbonation mixing conditions for 2<sup>nd</sup> test

Series	Specimen	CO <sub>2</sub> Injection		Mixing time (sec.)	
		Quantity (B <sub>w</sub> %)	Time (sec.)	Extra	Total
Plain		-	-	-	240
Extra mixing time	MT0	0.15	5	-	240
	MT30			30	270
	MT60			60	300
	MT90			90	330
	MT120			120	360
CO <sub>2</sub> injection quantity	IQ0.1	0.1	15	120	370
	IQ0.2	0.2			
	IQ0.3	0.3			
	IQ0.4	0.4			
	IQ0.5	0.5			
CO <sub>2</sub> injection time	IT5	0.15	5	120	360
	IT30		30		385
	IT60		60		415
	IT90		90		445
	IT120		120		475

## 2.4 실험방법

플로우 시험은 KS L 5105(수경성 시멘트 모르타르의 압축 강도 시험방법)에 따라 플로우 테이블을 15초 동안 25회, 12.7 mm의 높이로 낙하시킨 후 4개의 지름을 측정하였고, 본 연구에서는 4개의 평균값을 유동성 결과로 사용하였다.

압축강도 시험을 위해 상기 기계적 혼합으로 얻은 모르타르를 KS L ISO 679(시멘트의 강도 시험 방법)에 따라 40 x 40 x 160 mm 각주형의 모르타르 시험체를 제작하였다. 제작된 시험체는 20 ± 1 °C, 상대 습도 90 % 이상에서 24시간 보관 후 탈형하였으며 탈형 직후 20 ± 1 °C 수조에서 양생을 실시하였다. 압축강도는 UTM(Universal Testing Machine)을 사용하여 2,400 ± 200 N/s의 재하속도로 재령 3, 7, 28일에 측정하였다. 본 연구에서는 배합당 3개의 실험체에 대한 압축강도를 측정하고, 그 평균값을 압축강도로 하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 결과분석 : 1단계

1단계에서는 CO<sub>2</sub> 주입 및 배합수량에 따라 모르타르 물성에 미치는 영향인자를 파악하고자 실험을 진행하였다.

모르타르 배합 A, B에서 모두 CO<sub>2</sub> 주입에 따라 유동성 감소가 확인되었으며, CO<sub>2</sub> 주입 시 물/시멘트비 5 % 상향을 통해 기준 배합(PA)과 유사한 수준의 유동성 확보가 가능하였다. 압축강도에서는 물/시멘트비 증가에 따라 강도감소를 확인하였으며, CO<sub>2</sub>를 주입함에 따라 강도감소가 소폭 증가되는 것으로 나타났다.

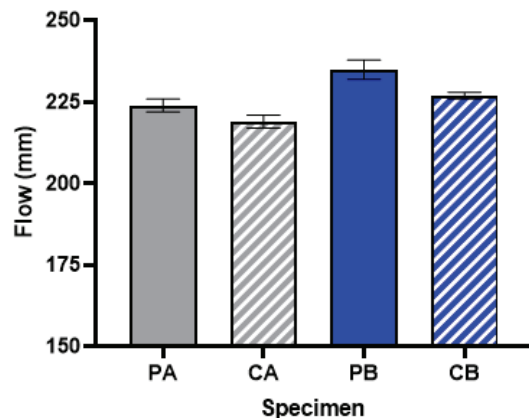


Fig. 4. Effects of CO<sub>2</sub> and unit water content on the flowability of mortars

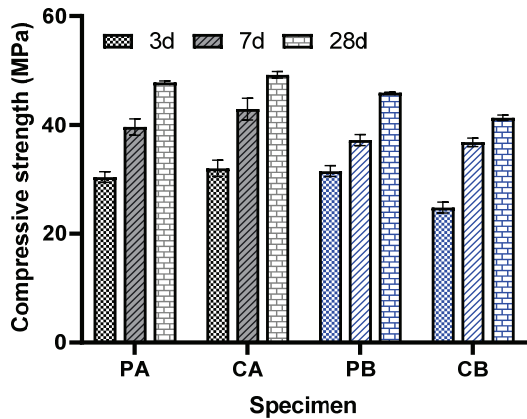


Fig. 5. Effects of CO<sub>2</sub> and unit water content on the compressive strength of mortars

CO<sub>2</sub> 주입 모르타르의 물/시멘트비를 조정하는 경우, 물/시멘트 비 상향을 통해 모르타르의 유동성 확보는 가능하지만 배합수량 증가에 따른 강도감소와 비교하여 CO<sub>2</sub> 주입에 따른 강도 증진효과가 미흡하여 배합수량 조정에 의한 물성확보는 부적합할 것으로 판단된다.

따라서, 2단계에서는 물/시멘트비를 0.5로 고정하고 비빔 조건 (CO<sub>2</sub> 주입 후 추가비빔시간, CO<sub>2</sub> 주입량, CO<sub>2</sub> 주입시간)을 변경하여 CO<sub>2</sub> 주입 모르타르의 최적 비빔조건을 도출하고자 한다.

### 3.2 결과분석 : 2단계

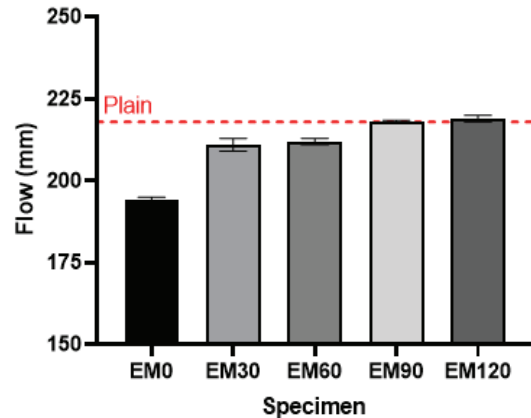
#### 3.2.1 추가 비빔시간에 따른 모르타르의 유동성 및 압축강도

추가 비빔시간에 따른 모르타르의 유동성 및 상대 압축강도 비 결과를 Fig. 6에 요약하였다. 상대 압축강도 비는 Plain 실험체의 압축강도에 대한 실험체들의 압축강도 비를 나타낸다. CO<sub>2</sub> 주입량을 0.15 B<sub>M</sub>.%로 고정하고, CO<sub>2</sub> 주입 후 추가비빔시간을 조정하면 결과, 추가비빔시간 증가에 따라 유동성 증가가 확인되었으며 추가비빔시간 90초부터 기준 배합과 유사한 수준의 유동성 확보가 가능한 것을 확인하였다.

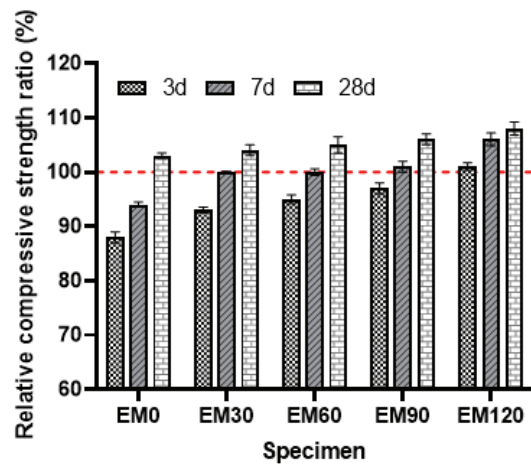
모든 배합 수준에서 재령 28일에 3~8 % (1.3~3.8 MPa) 강도증진이 나타났으며 추가비빔시간 120초부터 모든 재령에서 기준 배합 대비 동등 또는 이상의 강도발현성능을 확인하였다.

#### 3.2.2 CO<sub>2</sub> 주입량에 따른 모르타르의 유동성 및 압축강도

Fig. 7은 CO<sub>2</sub> 주입량에 따른 모르타르의 유동성 및 상대 압축강도 비 결과를 나타낸다. CO<sub>2</sub> 주입량 0.1~0.5 B<sub>M</sub>.% 혼입에 따른 모르타르 유동성 결과, CO<sub>2</sub> 주입량 증가에 따라 유동성 감소가



(a) Flowability



(b) Relative compressive strength ratio at different curing ages

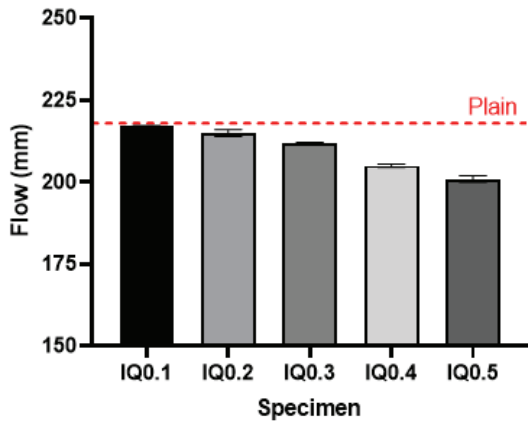
Fig. 6. Effects of extra mixing on the flowability and compressive strength

확인되었으며, CO<sub>2</sub> 주입량 0.5 B<sub>M</sub>.% 경우에는 Plain 대비 약 8%까지 감소하였다.

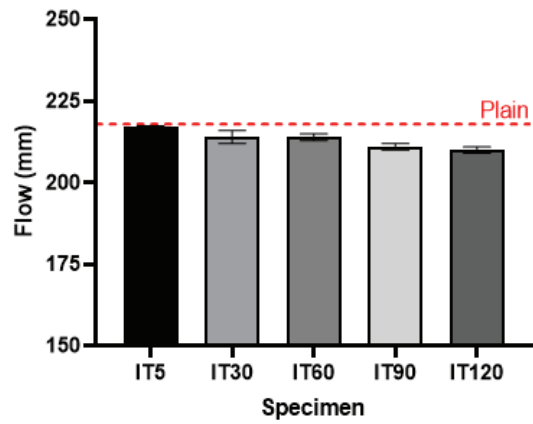
압축강도에서도 모든 재령에서 기준 배합 대비 동등이상 수준의 압축강도발현을 확인하였으며 0.1~0.2, 0.4~0.5 B<sub>M</sub>.% 범위에서 7~11 %의 높은 강도증진이 나타났다.

#### 3.2.3 CO<sub>2</sub> 주입시간에 따른 모르타르의 유동성 및 압축강도

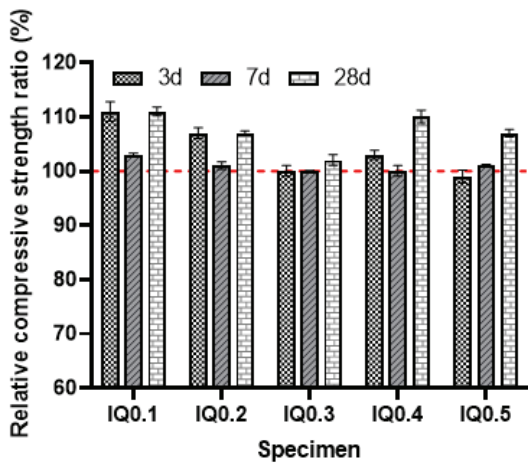
CO<sub>2</sub> 주입 시간이 모르타르의 유동성 및 상대 압축강도 비에 미치는 영향을 파악하고자 실험을 진행하였으며, 실험결과는 Fig. 8에 요약하였다. 동일 CO<sub>2</sub> 주입량 (0.15 B<sub>M</sub>.%)에서 CO<sub>2</sub> 주입시간을 조정하면 결과, CO<sub>2</sub> 주입시간 증가에 따라 모르타르의 유동성이 감소하는 경향을 확인하였다.



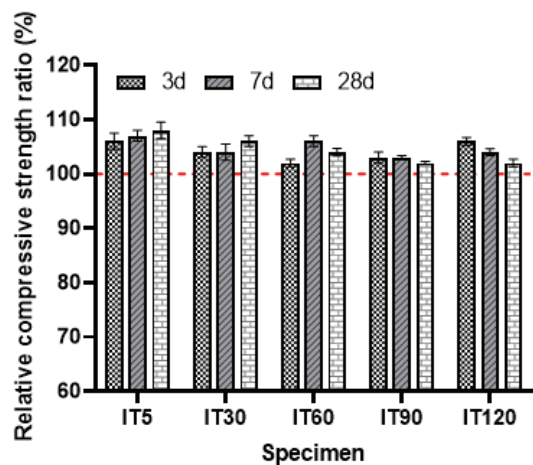
(a) FlowabilityReferences



(a) Flowability



(b) Relative compressive strength ratio at different curing ages



(b) Relative compressive strength ratio at different curing ages

Fig. 7. Effects of CO<sub>2</sub> injection quantity on the flowability and compressive strength

Fig. 8. Effects of CO<sub>2</sub> injection time on the flowability and compressive strength

압축강도에서는 재령 28일 기준 모든 수준에서 압축강도 증진이 나타났으나 CO<sub>2</sub> 주입시간 증가에 따라 압축강도 증진효과는 감소되는 것을 확인하였다. 하지만 전 재령에서의 압축강도를 고려할 경우, CO<sub>2</sub> 주입시간 증가가 모르타르 강도발현성능 향상에 미치는 영향은 미미할 것으로 사료된다.

### 3.3 In-situ carbonation 영향 평가

시멘트 모르타르 비빔과정 동안 기체 CO<sub>2</sub>는 배합수에 용해되고 H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>로 수화한다. 수화된 H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>는 H<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>로 이온화된다. 그중 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>는 시멘트에서 용해된 Ca<sup>2+</sup>이온과 반응하여 시멘트 매트릭스 내에서 나노사이즈의 CaCO<sub>3</sub>를 생성한다(Young et al. 1974).

이러한 나노사이즈의 CaCO<sub>3</sub>는 시멘트 수화생성물인 C-S-H

의 핵형성부(nucleation site) 역할을 하여 CO<sub>2</sub>를 주입하지 않은 모르타르(Plain)보다 더 많은 C-S-H를 생성하고(Luan et al. 2022; Monkman et al. 2016), 모르타르의 미세구조를 밀실히 충전하여 강도증진에 영향을 주었을 것이라고 판단된다.

따라서, CO<sub>2</sub> 주입 시 Plain 대비 더 많은 양의 수화생성물 간 마찰로 인하여 유동성이 감소하였으며, 감소된 유동성을 보완하기 위한 추가비빔이 필요할 것으로 판단된다.

또한, H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>가 이온화 될 때 발생하는 H<sup>+</sup>는 시멘트 모르타르의 pH를 감소시켜 장기적으로 시멘트의 수화반응을 저해할 것으로 예상하였으나, CO<sub>2</sub> 주입량 0.5 B<sub>wf</sub>%일 때 모르타르의 pH는 약 0.3%정도 감소하여 pH 감소 효과는 미비한 것으로 확인하였다(Thomas 2019).

## 4. 결론

본 연구에서는 CO<sub>2</sub> 활용기술 확보의 일환으로 시멘트계 재료의 CO<sub>2</sub> 고정화를 통한 성능증진을 목적으로 기체 CO<sub>2</sub> 주입 시멘트계 재료의 모르타르 비빔장비를 구축하고자 하였다. 또한, 기 구축된 비빔장비를 활용하여 구체적인 비빔방법 및 CO<sub>2</sub>를 주입한 모르타르의 유동성과 압축강도를 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. CO<sub>2</sub> 주입 직후 모르타르 유동성 감소가 나타나며 이는 물/시멘트비 조정을 통한 재료적 방법으로 동등 수준의 유동성 확보는 가능하나 물/시멘트비 증가에 따른 강도감소로 인해 부적합할 것으로 사료된다.
2. 동일한 물/시멘트비에서 초기 기체 CO<sub>2</sub> 주입에 따라 나타나는 유동성 감소는 CO<sub>2</sub> 주입완료 후 비빔시간 조정을 통해 제어가 가능하며, 기존 비빔방법과 비교하여 추가비빔시간 120초 이상에서 기존 배합과 동등 이상의 유동성 확보와 모든 재령에서의 강도증진이 가능하다.
3. 기체 CO<sub>2</sub> 주입을 증가에 따라 압축강도 증진효과는 비례하여 나타나지 않았으며, 유동성 및 재령별 압축강도를 복합 고려할 경우 0.1~0.2 B<sub>wt</sub>%가 기체 CO<sub>2</sub>의 적정 주입율로 사료된다.
4. 동일 기체 CO<sub>2</sub>량에 대해 주입시간이 길어질수록 유동성 감소 폭이 커지는 반면 압축강도에서는 큰 변화가 나타나지 않았다. 하지만 건설산업 CCUS 기술로써 활용되기 위해서는 상기 유동성 감소에 대해 CO<sub>2</sub> 고정화량 변동 등의 추가적인 미세분석을 통한 기술의 구체화가 필요하며, 이를 통해 CO<sub>2</sub> 사용에 따른 물성변화와 CO<sub>2</sub> 고정화량을 복합적으로 고려한 사용방안의 도출이 요구된다.

## Conflicts of interest

None.

## 감사의 글

이 논문은 2023년 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20212010200080, 시멘트 산업 발생 CO<sub>2</sub> 활용 in-situ 탄산화 기술 개발).

## References

- Berger, R.L., Young, J.F., Leung, K. (1972). Acceleration of hydration of calcium silicates by carbon dioxide treatment, *Nature Physical Science*, **240(97)**, 16–18.
- Bertos, M.F., Simons, S.J.R., Hills, C.D., Carey, P.J. (2004). A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO<sub>2</sub>, *Journal of Hazardous Materials*, **112(3)**, 193–205.
- CARBONCURE Company's Website. (2023). <https://www.carboncure.com/ready-mix/>.
- Guo, B., Chu, G., Yu, R., Wang, Y., Yu, Q., Niu, D. (2023). Effects of sufficient carbonation on the strength and microstructure of CO<sub>2</sub>-cured concrete, *Journal of Building Engineering*, **76**, 107311.
- Jang, J.G., Kim, G.M., Kim, H.J., Lee, H.K. (2016). Review on recent advances in CO<sub>2</sub> utilization and sequestration technologies in cement-based materials, *Construction and Building Materials*, **127**, 762–773.
- Luan, C., Zhou, Y., Liu, Y., Ren, Z., Wang, J., Yuan, L., Du, S., Zhou, Z., Huang, Y. (2022). Effects of nano-SiO<sub>2</sub>, nano-CaCO<sub>3</sub> and nano-TiO<sub>2</sub> on properties and microstructure of the high content calcium silicate phase cement(HCSC), *Construction and Building Materials*, **314**, 125377.
- Monkman, S., MacDonald, M., Hooton, R.D., Sandberg, P. (2016). Properties and durability of concrete produced using CO<sub>2</sub> as an accelerating admixture, *Cement and Concrete Composites*, **74**, 218–224.
- Olajire, A.A. (2013). A review of mineral carbonation technology in sequestration of CO<sub>2</sub>, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **109**, 364–392.
- Thomas, T. (2019). Impact of CO<sub>2</sub> Utilization in Fresh Concrete on Corrosion of Steel Reinforcement, Technical Note of CARBONCURE.
- Wu, K., Wang, K., Han, J., Lee, H.S., Lim, S. (2022). Effects of nano palm oil fuel ash on hydration of cement under the accelerated carbonation curing, *Materials Letters*, **327**, 132935.
- Young, J.F., Berger, R.L., Breese, J. (1974). Accelerated curing of compacted calcium silicate mortars on exposure to CO<sub>2</sub>, *Journal of the American Ceramic Society*, **57(9)**, 394–397.

### 기체 CO<sub>2</sub>를 사용한 In-situ 탄산화 모르타르 성능평가

본 연구에서는 국내 레미콘 산업의 산업부산 CO<sub>2</sub> 활용기술 확보를 통한 CCUS 기술의 부상을 목적으로 기체 CO<sub>2</sub>를 시멘트 모르타르, 콘크리트 등 시멘트계 재료에 직접 주입하여 사용하기 위해 총 2단계로 나누어 연구를 수행하였다. 1단계에서는 기체 CO<sub>2</sub> 사용에 따라 시멘트 모르타르의 물성에 미치는 영향인자를 도출하고, 영향인자에 대해 기준 배합과 동등한 물성발현을 위한 재료적 검토를 포함하였다. 1단계 검토결과, 물/시멘트비 조정 등이 일반적인 재료적 접근에 의한 물성확보는 한계가 있는 것을 확인하였으며, 이에 2단계에서는 CO<sub>2</sub> 사용방법, 시멘트 모르타르의 비빔방법 등 CO<sub>2</sub>를 주입한 모르타르의 최적화에 대한 전반을 포함하였다. 기체 CO<sub>2</sub>의 모르타르 주입 시 나타나는 물성변화에 대한 해결방안과 압축강도 성능증진을 위한 기체 CO<sub>2</sub>의 최적 주입율 및 주입시간을 도출하였다. 그 결과, 일반 모르타르와 비교하여 최종 비빔 후 120초 이상의 추가비빔시간이 요구되는 것을 확인하였으며 유동성 및 압축강도 발현성능을 고려한 기체 CO<sub>2</sub>의 적정 주입율은 시멘트량 중량 대비 0.1~0.2 %로 도출되었다. 기체 CO<sub>2</sub> 주입시간 증가에 따른 추가적인 강도증진효과는 나타나지 않았으며, CCUS 기술로써 활용되기 위해서는 CO<sub>2</sub> 고정화량 평가 등 미세분석을 통한 추가적인 검토가 필요하다.